بررسی عددی پایداری دیوارهای خاکی مسلح با ژئوسنتتیک★

«یادداشت پژوهشی»

آتنا فردوسی شاهاندشتی(۱)   فریدون مقدس نژاد(۲)   اسماعیل افلاکی(۳)

چکیده *در این پژوهش پایداری دیوارهای خاکی مسلح با ژئوسنتتیک با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود PLAXIS مورد بررسی قرار گرفت تا تأثیر عوامل گوناگونی چون سختی محوری ژئوسنتتیک، فاصله‌ی عمودی بین لایه‌های ژئوسنتتیک، طول لایه‌های ژئوسنتتیک، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز بر تغییرشکل‌های دیوار و هم‌چنین نیروهای محوری به‌وجود آمده در المان مسلح‌کننده، مورد ارزیابی قرار گیرد. در ابتدا صحت نتایج تحلیل در مقایسه با نتایج یک پروژه‌ی واقعی مورد ارزیابی قرار گرفت سپس یک تحلیل پارامتریک مفصل انجام شد. نتایج این تحلیل‌ها نشان داد که با افزایش میزان سختی کششی ژئوسنتتیک از مقدار تغییرشکل‌های افقی دیوار کاسته می‌شود. لیکن اثر افزایش سختی محوری ژئوسنتتیک در کاهش تغییرشکل‌های افقی دیوار فقط تا مقدار مشخصی قابل‌ملاحظه می‌باشد و پس از این مقدار معین، افزایش سختی ژئوسنتتیک تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بر کاهش تغییرشکل‌ها و نشست‌ها ندارد. هم‌چنین با کاهش فاصله بین لایه‌های مسلح‌کننده و افزایش طول لایه‌ی ژئوسنتتیک، میزان تغییرشکل‌های افقی دیوار کاهش می‌یابد. اما این کاهش فقط تا تعداد لایه‌ی معین و طول معینی محسوس می‌باشد و بعد از آن تغییرات کمتر می‌شود.*

واژه‌های کلیدی دیوار مسلح، ژئوسنتتیک، اجزای محدود، تغییر شکل افقی، نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک.

Numerical Analysis of Geosynthetic Reinforced Walls

A. Shahandashti   F. Moghadas nejad   E. Aflaki

Abstract *In this study, stability of geosynthetic reinforced soil retaining walls investigated using PLAXIS code that is based on finite element method. The effects of axial stiffness, length and vertical space between geosynthetic layers, internal friction angle of soil wall and cohesion of foundation on deformations of wall and maximum axial force of geosynthetic have been investigated. Results of analyses indicated that horizontal displacements and settlements of wall reduce with increase in axial stiffness, length and decrease of vertical space between reinforcement layers but there is a critical value for axial stiffness, length and number of geosynthetic layers which increase more than this certain value has not significant effect on reduction of settlements and horizontal displacements of wall. Also vertical and horizontal deformations of wall reduce with increase in internal friction angle of soil wall and cohesion of foundation but effect of these two factors on reduction of deformations for values more than a critical value are almost constant.*

Keywords reinforced wall, geosynthetic, finite element, horizontal deformation, settlement, maximum axial force of geosynthetic

---

★ تاریخ دریافت مقاله ۹۱/۳/۵ و تاریخ پذیرش ۹۳/۱/۲۵ آن می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسئول : کارشناس ارشد عمران، راه و ترابری، دانشگاه علوم تحقیقات تهران.

(۲) استادیار، دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) استادیار، دانشکده‌ی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

دیوارهای حائل از جمله ابنیه‌ی فنی هستند که در شبکه‌های حمل و نقل جاده‌ای و ریلی کاربرد گسترده‌ای دارند.

از نقطه نظر سازه‌ای دیوارهای حائل به دو دسته، مسلح و غیرمسلح تقسیم می‌شوند.

استفاده از مسلح‌کننده در دیوارهای خاکی مسلح با دو هدف اصلی زیر صورت می‌گیرد:

۱- افزایش پایداری و امکان احداث شیب‌های تندتر.

۲- بهبود شرایط تراکم.

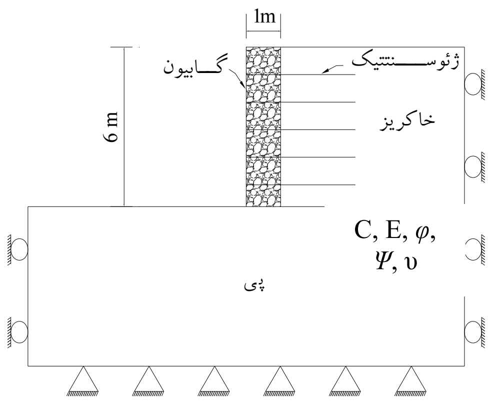
افزایش پایداری شیب امکان احداث شیب‌های تندتر را در بسیاری پروژه‌ها از جمله پروژه‌های راه‌سازی فراهم می‌کند. بهبود شرایط تراکم نیز ضمن جلوگیری از فرسایش سطوح دیوار امکان اعمال بار بیشتر را فراهم می‌کند [2]. خاک مصالحی است که دارای مقاومت فشاری و برشی خوبی است ولی چندان قادر به تحمل نیروهای کششی نمی‌باشد [3]. برای مسلح‌سازی هم می‌توان از فلزات و هم از ژئوسنتتیک‌ها استفاده نمود

پایداری دیوارهای خاکی مسلح توسط پژوهشگران متعددی مورد بررسی قرار گرفت. Elias et al. [2] بر پایه‌ی روش‌های تعادل حدی، نحوه‌ی طراحی دیوارهای خاکی و شیروانی‌های مسلح را به‌صورت گام‌های مدونی خلاصه نمودند Rowe and Ho [4] با استفاده از نرم‌افزار عددی اجزای محدود AFENA به بررسی رفتار دیوار خاکی مسلح با ژئوسنتتیک پرداختند. آنها در این پژوهش به بررسی اثر مسلح‌سازی با ژئوسنتتیک در توزیع تنش عمودی در پی و دیوار، توزیع تنش و کرنش افقی دیوار و هم‌چنین تنش‌های افقی و قائم وارد به پوشش جلوی دیوار پرداختند و نمودارهایی ارائه نمودند که برای انجام تحلیل‌های پارامتریک مفید می‌باشد. Budhu and Halloum [5] با استفاده از روش تعادل حدی، پایداری دینامیکی داخلی دیوار مسلح با ژئوتکستایل را مورد بررسی قرار دادند. Abdi et al. [6] برای بررسی دیوار خاکی مسلح از تکنیک همگن‌سازی محیط خاک مسلح استفاده نمودند. آنها در این پژوهش با استفاده از دو روش تحلیلی و روش عددی اجزای محدود و به‌کمک برنامه‌ی XPRESS به تعیین ارتفاع گسیختگی دیواری مسلح و دارای مشخصاتی معین پرداختند و نتایج را با اطلاعات آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار دادند. Zhenqi CAI and Bathurst [7] با استفاده از روش عددی اجزای محدود به تحلیل دینامیکی دیوار مسلح با ژئوسنتتیک پرداختند. Otani et al [8] با استفاده از روش عددی اجزای محدود، پایداری دیوار خاکی مسلح واقع بر زمینی شیب‌دار را مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش با انجام تحلیل پارامتریک اثر پارامترهایی چون شرایط مقاومتی پی و زاویه‌ی خاک‌برداری شیب پشت دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت. Skinner and Rowe [9] با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود AFENA به طراحی و بررسی رفتار دیوارهای خاکی مسلح با ژئوسنتتیک‌ها و تکیه‌گاه‌های پل‌های واقع بر پی‌های سست و در حال جاری شدن پرداختند. نتایج بررسی‌های آنها نشان داد که گزینه‌ی استفاده از سیستم خاک مسلح در تکیه‌گاه‌های پل‌ها به‌منظور تحمل ضربه‌های ناشی از پل می‌تواند از نظر اقتصادی قابل رقابت با گزینه‌ی استفاده از سیستم شمع‌کوبی در زیر تکیه‌گاه‌های واقع بر پی‌های سست باشد. Won and Kim [10] با انجام تعدادی آزمایش‌های آزمایشگاهی، تغییرشکل‌های داخلی دیوار خاکی مسلح با ژئوتکستایل بافته‌نشده و بافته‌شده را مورد ارزیابی قرار دادند. Klar and Sas [11] با استفاده از روش تحلیلی سازگاری جنبشی (KC) (kinematic compatibility) به بررسی رفتار مکانیکی دیوار خاکی مسلح پرداختند. آنها در این پژوهش اثر سازه‌ای پوشش جلوی دیوار و اندرکنش بین آن و لایه‌های خاک مسلح را بر پایداری سیستم مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتایج حاصل از این روش را با روش‌های

آنالیز پیوسته‌ی دقیق‌تری چون روش اجزای محدود و روش تفاضل محدود مورد مقایسه قرار دادند.

مدل‌سازی مسئله

در این پژوهش در جهت بررسی پایداری دیوار خاک مسلح، از نسخهٔ ۸/۲ نرم‌افزار PLAXIS استفاده شد که قادر به انجام تحلیل در فضای دوبعدی و به روش عددی اجزای محدود می‌باشد. در این نرم‌افزار به‌دلیل وجود المان مجزای ژئوسنتتیک و همچنین امکان ایجاد آسان لایه‌های خاکی، مدل‌سازی مسئله‌ی مورد بررسی با دقت و سرعت بالایی به انجام رسید. شکل کلی مدل و اجزای گوناگون موجود در آن به‌صورت شکل زیر می‌باشد.



شکل ۱ شکل کلی مدل دیوار خاکی مسلح با ژئوسنتتیک

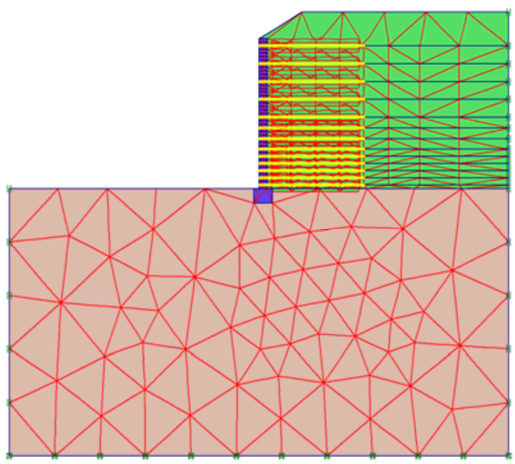
ارزیابی صحت نتایج تحلیل

پیش از انجام تحلیل‌های پارامتری، می‌بایست صحت تحلیل‌های انجام شده در این پژوهش از طریق استناد به مقالات معتبر و پروژهای واقعی، تأیید گردد. برای تأیید روش الگوسازی سامانه‌ی دیوار خاکی مسلح، از نتایج پژوهش Chungsik Yoo [12] استفاده شد. در آن پژوهش، با نصب ابزارهای اندازه‌گیری تغییرمکان بر روی دیوار خاکی مسلح، رفتار آن مورد بررسی قرار گرفته‌است. این دیوار در سال ۱۹۹۵ در اطراف یک سایت تولید مواد شیمیایی در جنوب کشور کره ساخته شد. طول این دیوار حدود ۳۰۰ متر و ارتفاع آن بین ۳/٦ تا ۹/۸ متر متغیر بوده‌است. Chungsik Yoo برای انجام مطالعه و بررسی عملکرد این دیوار خاکی مسلح با ژئوگرید، تعدادی کرنش‌سنج بر روی دیوار شرقی که ارتفاع آن برابر ۸/٤ متر بود، نصب نمود. فواصل بین ژئوگریدها بین ۰/٤ تا یک متر متغیر بوده‌است. برای مشخصات دیوار به مقاله‌ی [13] مراجعه گردد.

سختی کششی این دو نوع ژئوگرید به‌ترتیب برابر ٦۰ و ۸۰ کیلونیوتن بر متر می‌باشد. الگوی رفتاری لایه‌های خاکریز و پی موهر–کولمب و مدل رفتاری نمای بتنی و ژئوسنتتیک، الاستیک می‌باشد. همچنین بین المان‌های خاک و المان‌های ژئوگرید از المان سطح مشترک استفاده شد.

عموماً در اندرکنش خاک و سازه‌ی موجود در آن، سطح مشترک دارای مقاومت کمتری نسبت به لایهٔ خاک اطراف آن می‌باشد. این بدین معنی است که اندازهٔ R_{inter} باید از یک کمتر باشد. با توجه به اطلاعات موجود در این پژوهش، مقدار R_{inter} در این مدل برابر ۰/٦۷ تعیین گردید.

در شکل (۳) مدل اجزای محدود مسئله‌ی مورد بررسی در نرم‌افزار PLAXIS ارائه شده‌است.



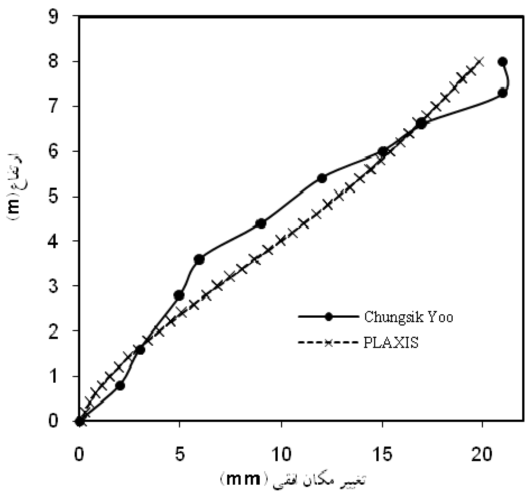
شکل ۳ الگوی اجزای محدود مسئله‌ی مورد بررسی در نرم‌افزار PLAXIS

پس از انجام تحلیل‌های لازم، نمودار تغییرمکان

افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار، برای مقایسه با مقادیر اندازه‌گیری شده، در نمودار شکل (٤) ارائه گردید. ملاحظه می‌شود که مطابقت خوبی میان دو پژوهش انجام شده وجود دارد. علت اختلاف‌های کوچکی که بین دو نمودار وجود دارد می تواند ناشی از عدم یکنواختی کامل دیوار در پروژه‌ی اصلی و هم‌چنین خطاهای ناشی از نحوه‌ی نصب و قرائت ابزارهای اندازه‌گیری کرنش باشد. با این وجود مشاهده می‌گردد که روند تغییرات شکل افقی دیوار در هر دو نمودار با یکدیگر مطابقت کلی دارد.

با توجه به شرایط مسئله، به‌منظور انجام تحلیل‌های مورد نیاز بر روی الگوهای ساخته‌شده حالت کرنش صفحه‌ای در نظر گرفته شد. هم‌چنین برای تشکیل شبکه‌ی اجزای محدود و انجام محاسبات، از اجزای مثلثی پانزده گرهی برای لایه‌ی خاک و پنج‌گرهی برای جز ژئوتکستایل استفاده گردید. الگوی رفتاری لایه‌های خاک‌ریز و پی موهر– کولمب می‌باشد که مشخصات آن مطابق جدول زیر است. این مقادیر با توجه به مشخصات مصالحی که به‌طور متداول برای انجام پروژه‌های مسلح‌سازی خاک‌های دانه استفاده می‌شوند، از طریق بررسی مقالات گوناگون انتخاب گردید.

به‌منظور مطالعه‌ی تأثیر متقابل خاک، ژئوتکستایل و هندسهٔ ترکیبی آنها، در پایداری دیوار خاکی مسلح، پارامترهای گوناگونی که مشخص‌کنندهٔ ویژگی هر کدام از عوامل بالا می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت. در هر تحلیل با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، یک پارامتر ویژه تغییر داده شد و اثرات آن بررسی گردید. این پارامترها شامل سختی محوری ژئوسنتتیک، فاصله عمودی بین لایه‌ها و طول لایه‌های ژئوسنتتیک و هم‌چنین زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز می‌باشد.



شکل ٤ مقایسه‌ی نتایج تغییرات شکل افقی دیوار حاصل از PLAXIS و پژوهش Chungsik Yoo [13]

جدول ۱ مشخصات مصالح پی، خاک‌ریز و نمای گابیونی در تحلیل‌های مربوط به بررسی پارامترهای متغیر ژئوتسنتتیک

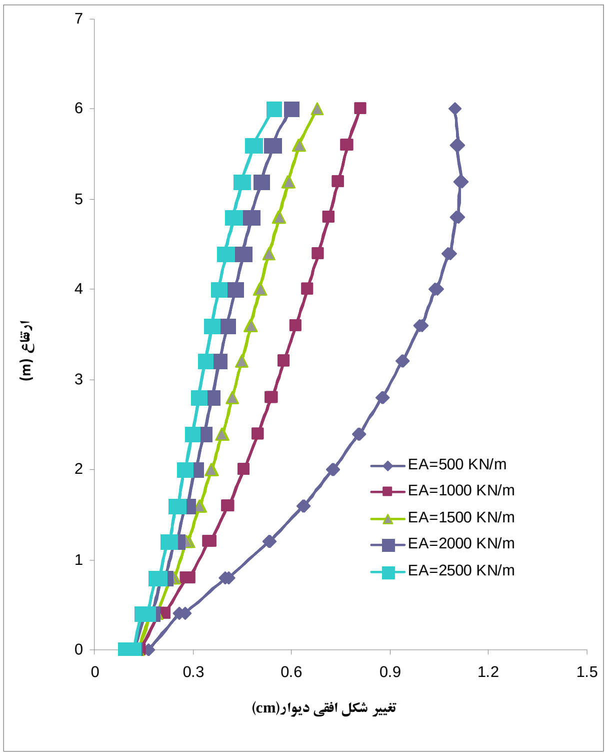
	γ (KN/m³)	C (KN/m²)	φ (درجه)	E (KN/m²)	ψ (درجه)	υ	Rinter
پی	۱٦	۸	۲۹	۲۰۰۰۰	۰	۰/۳۳	۱
خاک‌ریز	۱۹	۱	۳۰	۳۰۰۰۰	۰	۰/۳	۰/۹
گابیون	۱۹	۲۰	٤٥	۷۰۰۰	۰	۰/۳	۱

به‌منظور مطالعه‌ی تأثیر متقابل خاک، ژئوتکستایل و هندسهٔ ترکیبی آنها، در پایداری دیوار خاکی مسلح، پارامترهای گوناگونی که مشخص‌کنندهٔ ویژگی هر کدام از عوامل بالا می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفت. در هر تحلیل با ثابت نگه داشتن سایر پارامترها، یک پارامتر ویژه تغییر داده شد و اثرات آن بررسی گردید. این پارامترها شامل سختی محوری ژئوسنتتیک، فاصله‌ی عمودی بین لایه‌ها و طول لایه‌های ژئوسنتتیک و هم‌چنین زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز می‌باشد.

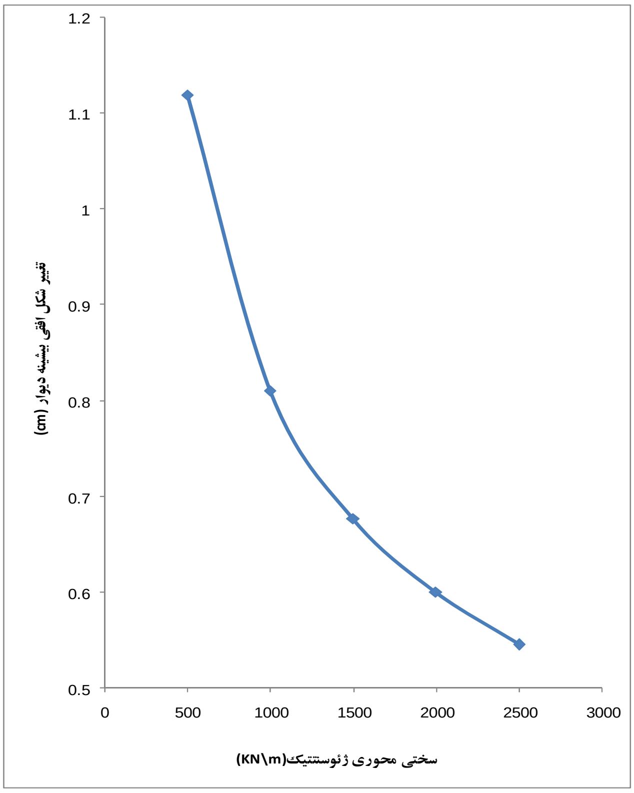
بررسی اثر سختی محوری ژئوسنتتیک

برای بررسی اثر مقدار سختی محوری ژئوسنتتیک بر پایداری سیستم پایداری دیوار خاکی مسلح با ژئوسنتتیک، مدل‌هایی از دیوار شامل لایه‌های ژئوسنتتیک با سختی‌های محوری متفاوت ۵۰۰، ۱۰۰۰، ۱۵۰۰، ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ کیلونیوتن بر متر، نسبت طول به ارتفاع دیوار (L/H) برابر یک و فاصله‌ی عمودی بین لایه‌های مسلح‌کننده (Sv) برابر ۰/٤ متر، ایجاد و مورد تحلیل قرار گرفته شد و اثر این پارامتر بر تغییر شکل افقی دیوار، نیروی محوری بیشینه‌ی لایه‌های ژئوسنتتیک و تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت. در شکل (۷) تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای سختی‌های محوری گوناگون ژئوسنتتیک ارائه شده‌است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد به‌طور کلی با افزایش میزان سختی کششی ژئوسنتتیک از مقدار تغییرشکل افقی دیوار کاسته می‌شود. هم‌چنین مشاهده می‌شود که اثر افزایش سختی محوری در کاهش تغییرشکل‌های افقی دیوار با افزایش فاصله از پی، افزایش می‌یابد. به‌عنوان نمونه، با افزایش مقدار سختی محوری از ۵۰۰ تا ۲۵۰۰ کیلو نیوتن در تراز ۲ متری از پی، مقدار تغییرشکل افقی دیوار ۰/٤٦سانتی‌متر کاهش می‌یابد در حالی‌که این مقدار در تراز ٤ متری ۰/٦٦ سانتی‌متر می‌باشد. علت این پدیده آنست که مقدار متوسط کرنش‌های کششی ایجادشده در راستای محور ژئوسنتتیک در ترازهای پایین کمتر است در نتیجه مقدار نیروی کششی متوسط لازم در ژئوسنتتیک برای تجهیز کامل ظرفیت کششی آن تأمین نمی‌گردد بنابراین افزایش سختی کششی تأثیر زیادی در کاهش تغییرشکل‌های افقی ندارد. برای درک بهتر این مسئله در نمودار شکل (۸) تغییرات شکل افقی بیشینه دیوار که در ارتفاع ٦ متری از پای دیوار اتفاق می‌افتد، به‌ازای سختی‌های محوری گوناگون ژئوسنتتیک رسم شده‌است. در این شکل مشاهده می‌گردد که با افزایش سختی محوری ژئوسنتتیک، شیب نمودار کاهش می‌یابد. به‌عبارت دیگر اثر این پارامتر در کاهش تغییرشکل‌های افقی دیوار با افزایش سختی محوری ژئوسنتتیک به‌تدریج کاهش می‌یابد. مقایسه‌ی نمودارهای حاصل از این پژوهش با نمودارهای ارائه‌شده توسط پژوهشگرانی چون Skinner and Rowe [9] و Klar and Sas [11]، نشان می‌دهد که روند تغییرات شکل افقی دیوار در ارتفاع مشابه یکدیگر می‌باشد یعنی با افزایش ارتفاع از پی، مقدار تغییرشکل افقی افزایش می‌یابد.

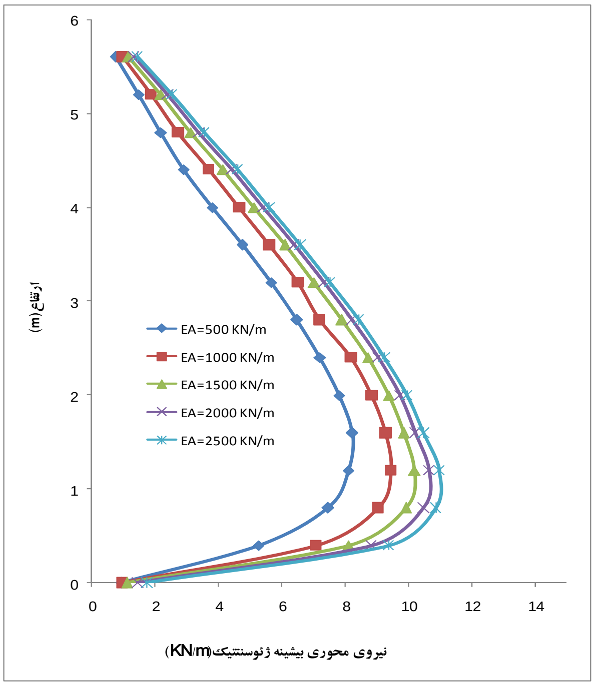
در نمودار شکل (۱۱) تغییرات نیروی محوری بیشینه ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای سختی‌های محوری گوناگون ژئوسنتتیک ارائه شده‌است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌گردد به‌طور کلی با افزایش میزان سختی محوری ژئوسنتتیک، مقدار نیروی محوری بیشینه در آن افزایش می‌یابد. هرچه نیروی محوری بیشتری در مسلح‌کننده به‌وجود آید بیانگر ایجاد کرنش‌های کششی بیشتر در خاک اطراف آن می‌باشد.



شکل ۷ تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای سختی‌های محوری گوناگون ژئوسنتتیک (L/H=1 و Sv=0.4 m)



شکل ۸ تغییرات شکل افقی بیشینه‌ی دیوار در تراز ٦ متری از پای دیوار به‌ازای سختی‌های محوری گوناگون ژئوسنتتیک (L/H=1 و Sv=0.4 m)

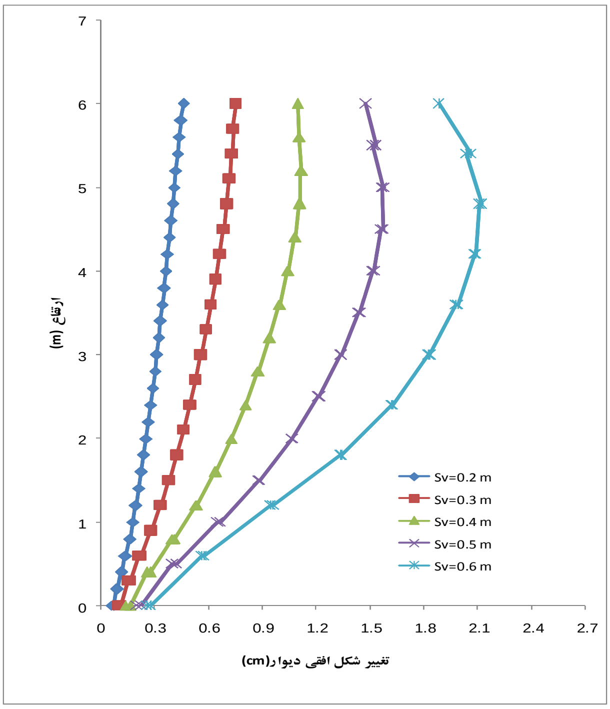


شکل ۱۱ تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای سختی‌های محوری گوناگون ژئوسنتتیک (Sv=0.4 m و L/H=1)

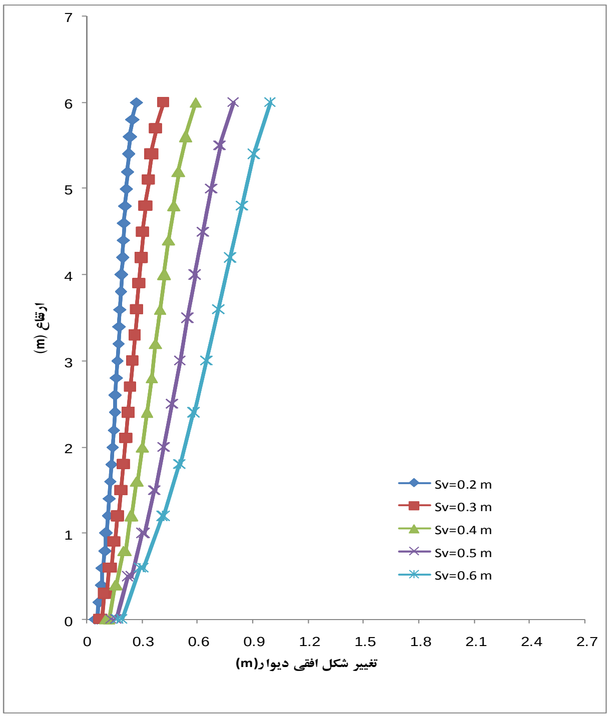
بررسی اثر فاصله‌ی عمودی بین لایه‌های ژئوسنتتیک

از دیگر عوامل مؤثر بر پایداری و کاهش تغییرشکل‌های دیوار خاکی مسلح، فاصله‌ی عمودی بین لایه‌های مسلح‌کننده (Sv) و یا به‌عبارت دیگر تعداد لایه‌های مسلح‌کننده می‌باشد. برای بررسی اثر این پارامتر، مدل‌هایی از مسئله‌ی مورد نظر با فواصل عمودی متفاوت ۰/۲، ۰/۳، ۰/۴، ۰/۵ و ۰/۶ متر بین لایه‌های ژئوسنتتیک، نسبت طول به ارتفاع دیوار (L/H) برابر یک و به‌ازای دو سختی کششی ۵۰۰، ۲۰۰۰ کیلونیوتن بر متر برای ژئوسنتتیک ایجاد و مورد تحلیل قرار گرفته شد و اثر این پارامتر بر تغییرشکل افقی دیوار، نیروی محوری بیشینه‌ی لایه‌های ژئوسنتتیک و تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت.

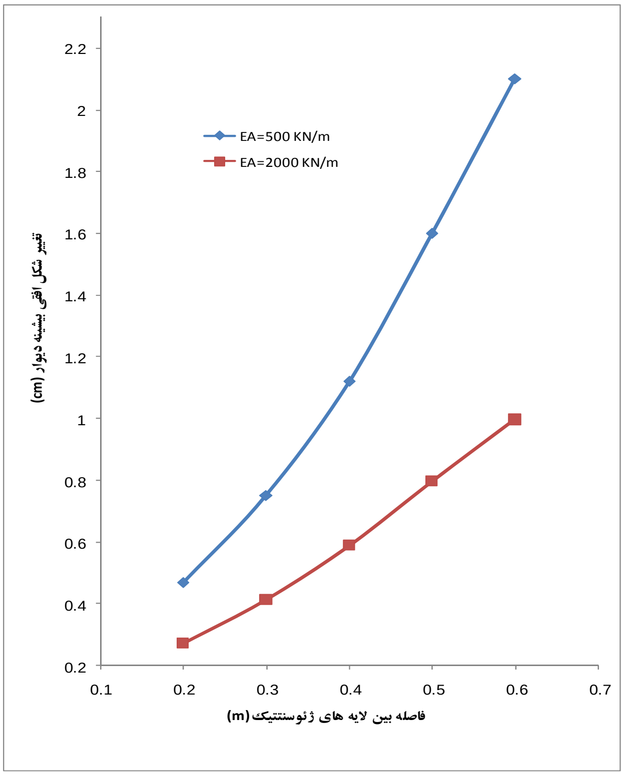
شکل‌های (۱۳) و (۱٤) به‌ترتیب تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار را به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک و برای دو سختی محوری متفاوت ۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در هر دو شکل مشاهده می‌شود به‌طور کلی با کاهش فاصله بین لایه‌های مسلح‌کننده و یا همان افزایش تعداد لایه‌های ژئوسنتتیک، میزان تغییرشکل‌های افقی دیوار کاهش می‌یابد. هم‌چنین با مقایسه‌ی منحنی‌های شکل‌های (۱۳) و (۱٤) می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش مقدار سختی محوری ژئوسنتتیک، اثر کاهش فاصله بین لایه‌های ژئوسنتتیک کمتر می‌شود. به‌عنوان مثال با کاهش فاصله بین لایه‌های ژئوسنتتیک از ۰/٦ به ۰/۲ متر به‌ازای سختی محوری ۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر، مقدار تغییرشکل افقی دیوار در ارتفاع ۳ متری از پی، ۱/۵۲ سانتی‌متر کاهش می‌یابد. در حالی‌که این مقدار برای سختی محوری ۲۰۰۰ کیلو نیوتن بر متر برابر ۰/٤۷ سانتی‌متر می‌باشد. برای درک بهتر مطالب بالا، در شکل (۱۵) نمودار تغییرات شکل افقی بیشینه دیوار به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک و برای سختی‌های محوری ۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلونیوتن بر متر رسم شده‌است. در این شکل مشاهده می‌گردد که برای هر دو مقدار متفاوت سختی محوری ژئوسنتتیک، با افزایش فاصله بین لایه‌های مسلح‌کننده، تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوار افزایش می‌یابد. اما با افزایش سختی محوری ژئوسنتتیک، شیب نمودار کاهش می‌یابد.



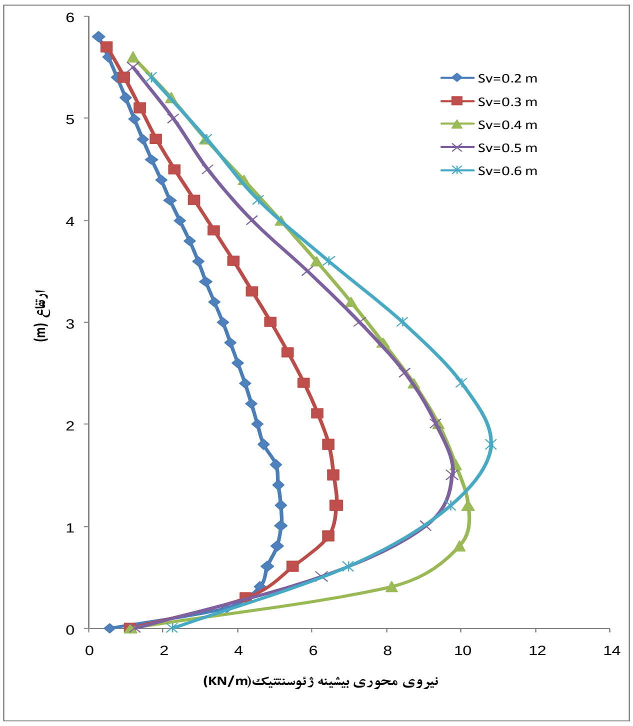
شکل ۱۳ تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک
(EA=500 KN/m و L/H=1)



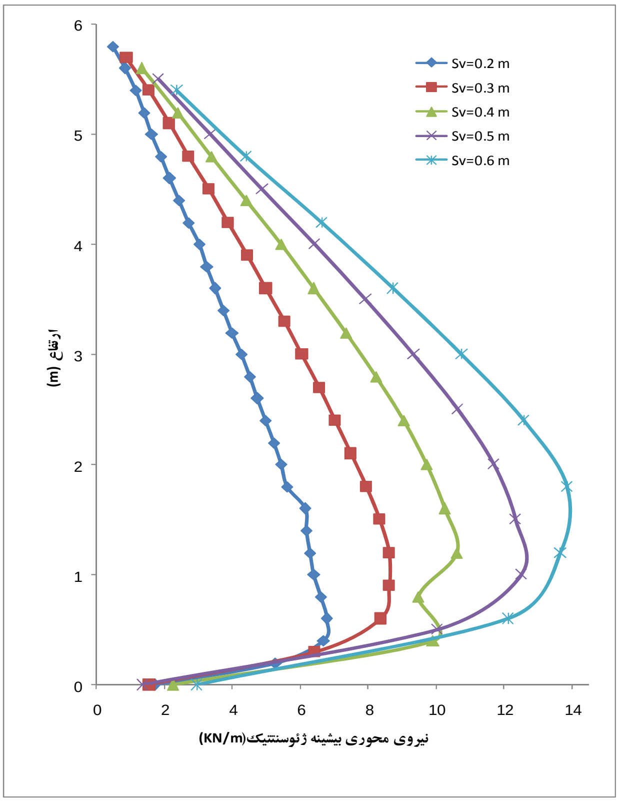
شکل ۱٤ تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک
(EA=2000 KN/m و L/H=1)



شکل ۱۵ تغییرات شکل افقی بیشینه‌ی دیوار به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک برای سختی‌های محوری ۵۰۰ و ۲۰۰۰ کیلونیوتن بر متر (L/H=1)



شکل ۱۶ تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک (EA=500 KN/m و L/H=1)



شکل۱۷ : تغییرات نیروی محوری بیشینه ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه های ژئوسنتتیک
(L/H=1 و EA=2000 KN/m)

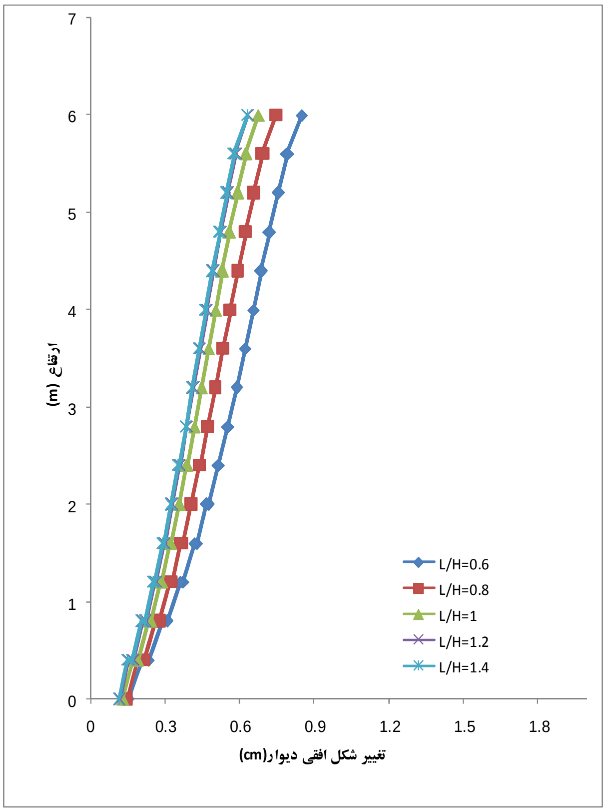
در نمودار شکل‌های (١٦) و (١٧) تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای فواصل عمودی متفاوت بین لایه‌های ژئوسنتتیک و برای دو سختی محوری متفاوت ٥٠٠ و ٢٠٠٠ کیلونیوتن بر متر ترسیم شده است. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد به‌طور کلی با افزایش فاصله بین لایه‌های مسلح‌کننده، مقدار نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک افزایش می‌یابد.

هم‌چنین با مقایسه‌ی منحنی‌های این دو شکل می‌توان نتیجه گرفت که هرچه مقدار سختی محوری ژئوسنتتیک بیشتر باشد، کاهش تعداد لایه‌ها یا همان افزایش فاصله بین لایه‌های مسلح‌کننده اثر بیشتری بر ایجاد نیروی محوری بیشینه و تجهیز کامل ظرفیت کششی ژئوسنتتیک دارد. به‌عبارت دیگر هرچه سختی محوری مسلح‌کننده بیشتر باشد، برای دیواری با شرایط هندسی و مشخصات مصالح معین می‌توان فواصل بین لایه‌ها را بیشتر نمود.

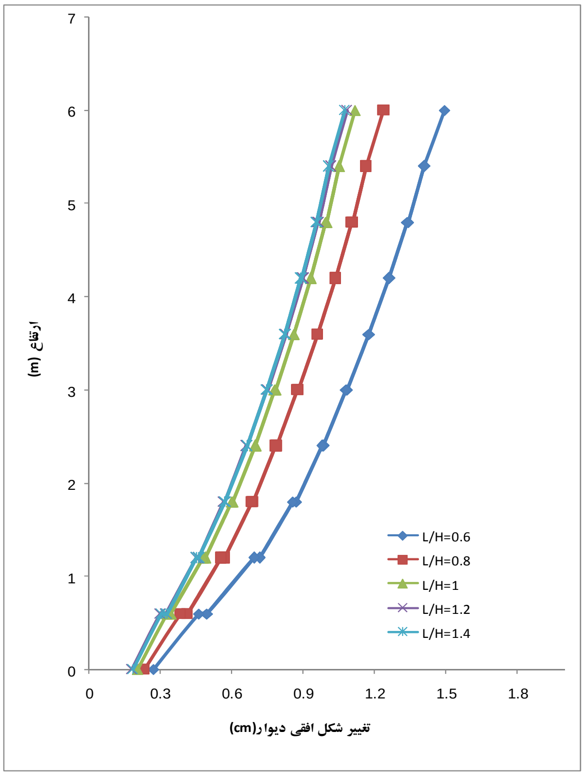
بررسی اثر طول لایه‌های ژئوسنتتیک

از دیگر عوامل مؤثر بر پایداری و کاهش تغییر شکل‌های دیوار خاکی مسلح، طول مسلح‌کننده می‌باشد. برای بررسی اثر این پارامتر، مدل‌هایی از مسئله‌ی مورد نظر با نسبت طول به ارتفاع دیوار (L/H) متفاوت ٠/٦، ٠/٨، ١، ١/٢ و ١/٤، به‌ازای فاصله‌ی عمودی ٠/٤ و ٠/٦ متر و سختی کششی ١٥٠٠ کیلونیوتن بر متر برای ژئوسنتتیک ایجاد و مورد تحلیل قرار گرفته شد و اثر این پارامتر بر تغییرشکل افقی دیوار، نیروی محوری بیشینه‌ی لایه‌های ژئوسنتتیک و تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت. شکل‌های (١٨) و (١٩) به‌ترتیب تغییرشکل افقی

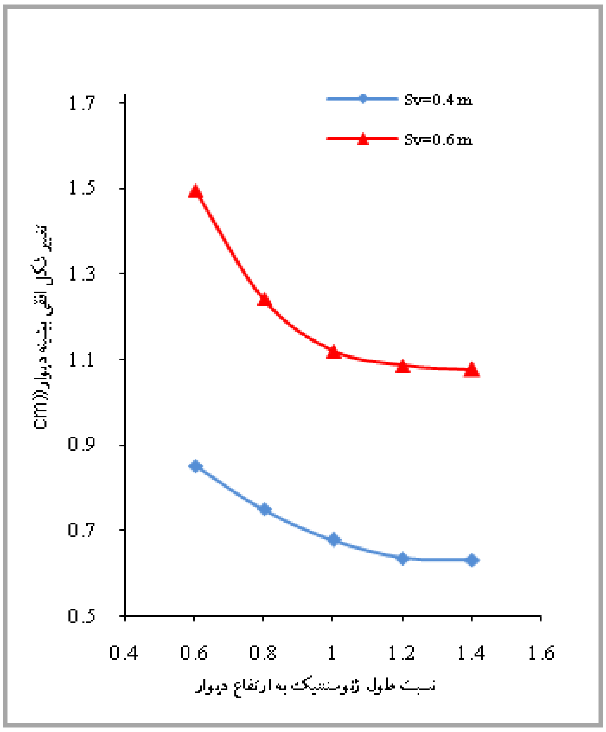
دیوار در برابر ارتفاع دیوار را به‌ازای طول‌های (نسبت طول به ارتفاع دیوار) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک و برای دو مقدار متفاوت فاصله بین لایه‌های برابر ۰/۴ و ۰/۶ متر و سختی محوری ۱۵۰۰ کیلونیوتن بر متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در هر دو شکل مشاهده می‌شود به‌طور کلی با افزایش طول لایه‌ی ژئوسنتتیک، میزان تغییرشکل‌های افقی دیوار کاهش می‌یابد. اما اگرچه با افزایش طول لایه‌ی ژئوسنتتیک میزان تغییرشکل‌های افقی کاهش می‌یابد اما این کاهش به‌ازای سختی محوری و تعداد لایه‌ی ثابت، فقط تا طول معینی محسوس می‌باشد و بعد از آن تغییرات بسیار ناچیز است. این بدان معنی است که برای ویژگی‌های معینی از خاک و ژئوسنتتیک، طول گیرداری بهینه‌ای برای مسلح‌کننده وجود دارد که اگر طول ژئوسنتتیک از آن بیشتر شود، تأثیر زیادی بر کاهش تغییرشکل‌ها ندارد. این طول بهینه به‌ازای سختی‌های محوری و فواصل عمودی گوناگون بین لایه‌ها، متفاوت می‌باشد. همچنین در شکل (۱۹) مشاهده می‌گردد که برای حالتی که فاصله‌ی عمودی بین لایه‌ها برابر ۰/۶ متر است، به‌ازای نسبت L/H های بیشتر از یک، فاصله بین منحنی‌ها زیاد است و پس از آن کاهش می‌یابد در حالی‌که برای حالتی که فاصله‌ی عمودی لایه‌ها برابر ۰/۴ متر می‌باشد (شکل ۱۸)، فاصله بین منحنی‌ها برای مقادیر L/H های بیشتر از یک، کمتر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که به‌ازای سختی محوری ثابت، هرچه فاصله‌ی بین لایه‌ها بیشتر باشد، طول گیرداری مورد نیاز افزایش می‌یابد. در شکل (۲۰) تغییرات شکل افقی بیشینه‌ی دیوار به‌ازای طول‌های (L/H) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک و برای فواصل عمودی ۰/۴ و ۰/۶ متر و سختی محوری ۱۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر رسم شده‌است.



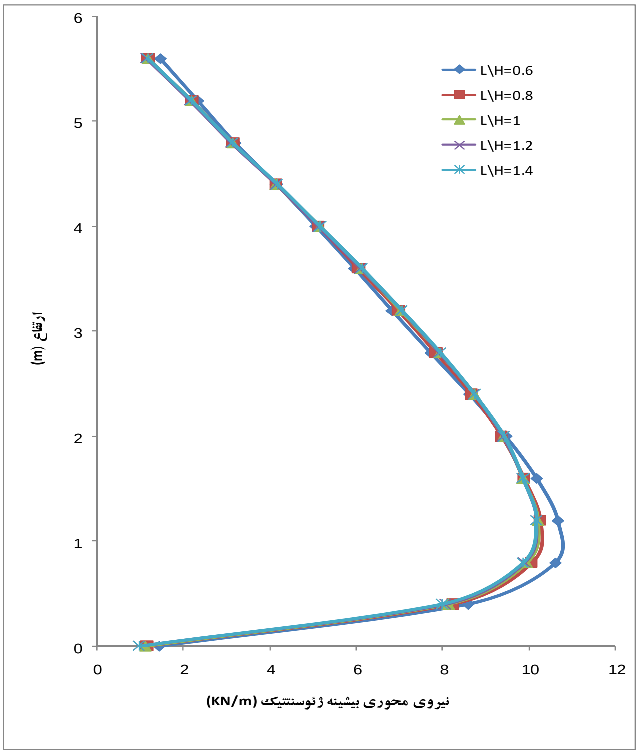
شکل ۱۸ تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای طول‌های (نسبت طول به ارتفاع دیوار) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک (EA=1500 KN/m و Sv=0.4 m)



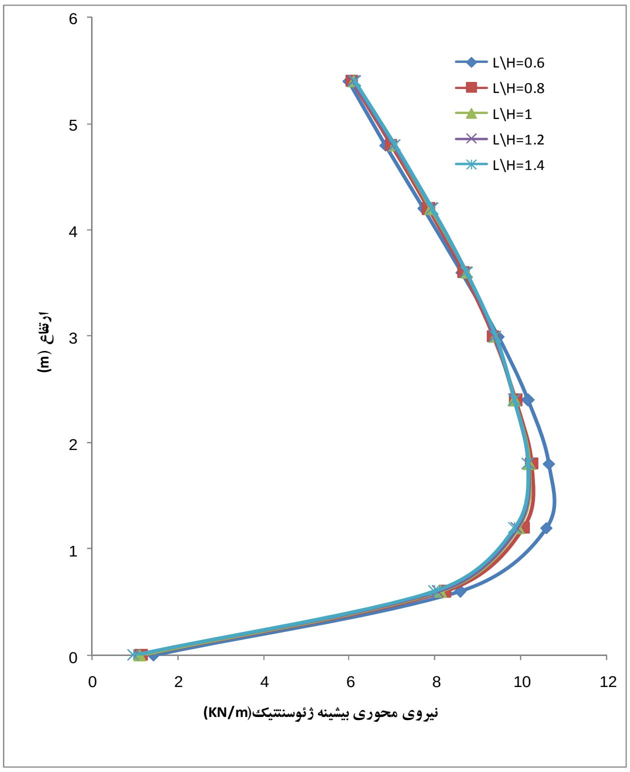
شکل ۱۹ تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای طول‌های (نسبت طول به ارتفاع دیوار) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک (EA=1500 KN/m و Sv=0.6 m)



شکل ۲۰ تغییرات شکل افقی بیشینه‌ی دیوار به‌ازای طول‌های (نسبت طول به ارتفاع دیوار) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک و برای فواصل عمودی ۰/۴ و ۰/۶ متر (EA=1500 KN/m)



شکل ۲۱ تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای طول‌های (نسبت طول به ارتفاع دیوار) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک (Sv=0.4 m و EA=1500 KN/m)

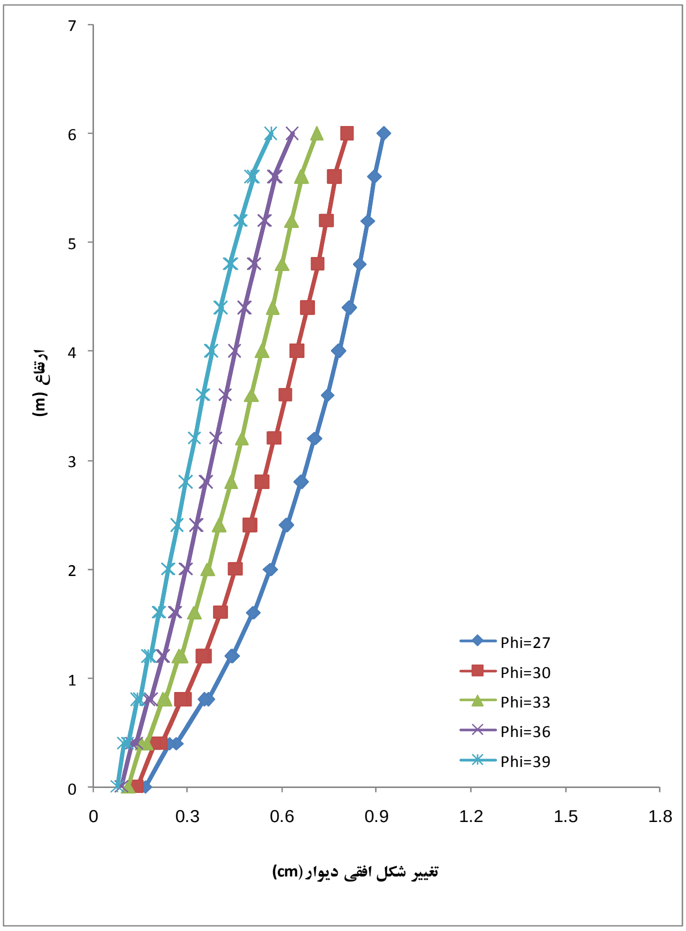


شکل ۲۲ تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای طول‌های (نسبت طول به ارتفاع دیوار) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک (Sv=0.6 m و EA=1500 KN/m)

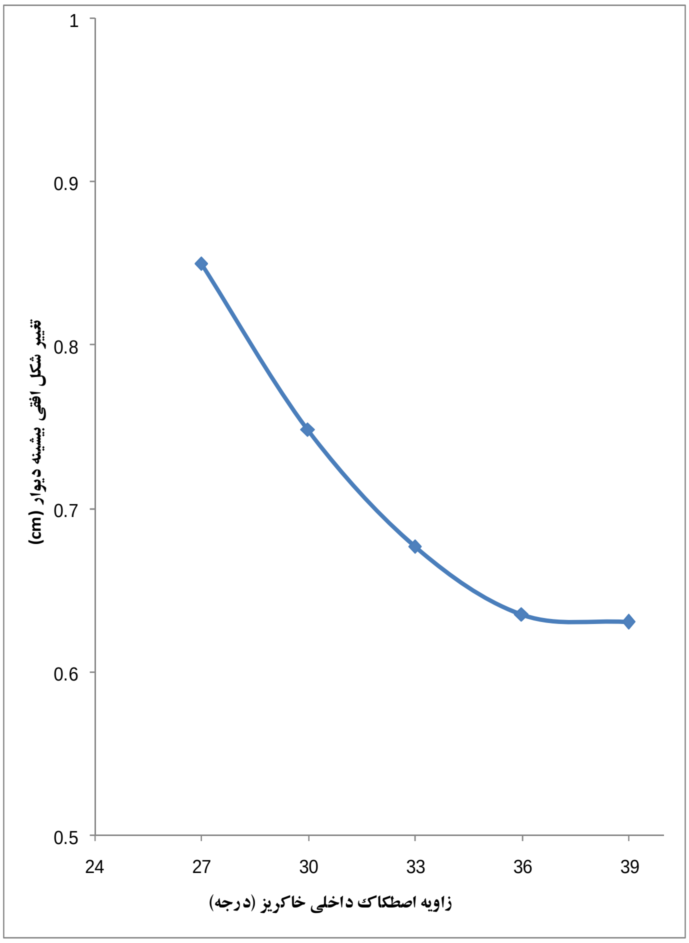
در نمودار شکل‌های (۲۱) و (۲۲) به‌ترتیب تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک را در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای طول‌های (L/H) متفاوت لایه‌های ژئوسنتتیک و برای سختی محوری ۱۵۰۰ کیلو نیوتن بر متر و فاصله بین لایه‌های متفاوت ۰/٤ و ۰/٦ متر نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل‌ها مشاهده می‌گردد به‌طور کلی با افزایش طول لایه‌های مسلح‌کننده، مقدار نیروی محوری بیشینه ژئوسنتتیک کاهش می‌یابد.

بررسی اثر زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز

از دیگر عوامل مؤثر بر پایداری و کاهش تغییر شکل‌های دیوار خاکی مسلح، زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز می‌باشد. برای بررسی اثر این پارامتر، مدل‌هایی از مسئله‌ی موردنظر با زوایای اصطکاک داخلی خاک‌ریز متفاوت ۲۷، ۳۰، ۳۳، ۳٦ و ۳۹ درجه به‌ازای نسبت طول به ارتفاع دیوار (L/H) یک، فاصله‌ی عمودی ۰/٤ متر و سختی کششی ۱۰۰۰ کیلونیوتن بر متر برای ژئوسنتتیک ایجاد و مورد تحلیل قرار گرفته شد و اثر این پارامتر بر تغییر شکل افقی دیوار، نیروی محوری بیشینه‌ی لایه‌های ژئوسنتتیک و تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوار مورد ارزیابی قرار گرفت.



شکل ۲۳ تغییرشکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای زوایای اصطکاک داخلی متفاوت خاک‌ریز (Sv=0.4 m ،EA=1000 KN/m و L/H=1)

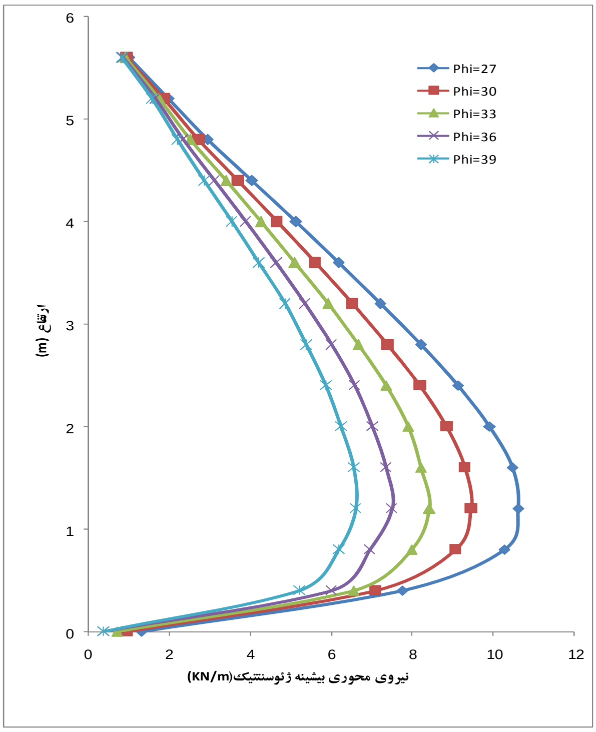


شکل ٢٤ تغییرات شکل افقی بیشینه‌ی دیوار به‌ازای زوایای اصطکاک داخلی متفاوت خاک‌ریز
(L/H=1 و EA=1000 KN/m ،Sv=0.4 m)

در نمودار شکل (٢٣) تغییر شکل افقی دیوار در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای زوایای اصطکاک داخلی متفاوت خاک‌ریز ارائه شده‌است. همان‌طور که مشاهده می‌گردد به‌طور کلی با افزایش میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز، از مقدار تغییر شکل افقی دیوار کاسته می‌شود.

هم‌چنین در نمودار شکل (٢٤) تغییرات شکل افقی بیشینه‌ی دیوار به‌ازای زوایای اصطکاک داخلی متفاوت خاک‌ریز رسم شده‌است. در این شکل مشاهده می‌گردد که به‌طور کلی با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز، از تغییرشکل افقی بیشینه‌ی دیوار کاسته می‌شود. هم‌چنین شیب نمودار نیز کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر اثر این پارامتر در کاهش تغییر شکل‌های افقی دیوار به‌تدریج کاهش می‌یابد و ثابت می‌ماند.

در نمودار شکل (٢٥) تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به ازای زوایای اصطکاک داخلی متفاوت خاک‌ریز ارائه شده‌است. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد به‌طور کلی با افزایش میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز، از مقدار نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک کاسته می‌شود. به‌عنوان مثال با افزایش مقدار زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز از ٢٧ به ٣٩ درجه، نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در ارتفاع ٢ متری از پی، ٣/٦٦ کیلونیوتن بر متر کاهش می‌یابد.



شکل ۲۵ تغییرات نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک در برابر ارتفاع دیوار به‌ازای زوایای اصطکاک داخلی متفاوت خاک‌ریز (L/H=1 و EA=1000 KN/m ،Sv=0.4 m)

نتیجه‌گیری

در زیر خلاصه‌ای از مهم‌ترین نتایج بـه‌دسـت آمـده از این پژوهش ارائه می‌گردد:

۱- با افزایش میزان سختی کششی ژئوسنتتیک از مقدار تغییرشکل‌های افقـی دیـوار کاسـته مـی‌شـود. اثـر افـزایش سـختی محـوری ژئوسـنتتیک در کـاهش تغییرشکل‌های افقی دیوار فقط تا مقـدار مشخصـی قابل‌ملاحظه می‌باشد و پـس از ایـن مقـدار معـین، افزایش سختی ژئوسنتتیک تأثیر قابل‌ملاحظه‌ای بـر کاهش تغییرشکل‌ها ندارد. هم‌چنین با افزایش میزان سختی محوری ژئوسنتتیک، مقدار نیـروی محـوری بیشینه در آن افزایش می‌یابد.

۲- با کاهش فاصله بین لایه‌های مسلح‌کننده و یا همان افـزایش تعـداد لایـه‌هـای ژئوسـنتتیک، میـزان تغییرشکل‌های افقی دیوار کاهش می‌یابد. امـا ایـن کـاهش فقـط تـا تعـداد لایـه‌ی معینـی محسـوس می‌باشد و بعد از آن تغییرات کمتـر مـی‌شـود. ایـن بدان مفهوم است که برای خاک و ژئوسـنتتیکی بـا ویژگی‌های معین، مقدار بهینه‌ای برای تعـداد لایـه-های مسلح‌کننده وجود دارد. اثر کاهش فواصل بین لایه‌های مسلح‌کننـده در کـاهش تغییرشـکل افقـی دیوار با افزایش فاصـله از پـی، افـزایش مـی‌یابـد. هـم‌چنـین بـا افـزایش مقـدار سـختی محـوری ژئوسـنتتیک، اثـر کـاهش فاصـله بـین لایـه‌هـای ژئوسنتتیک بر کاهش تغییرشکل‌هـای افقـی دیـوار کمتر می‌شود.

۳- با افزایش طـول لایـه‌ی ژئوسـنتتیک، میـزان تغییـر شکل‌های افقی دیوار کاهش می‌یابد. اما این کاهش به‌ازای سختی محوری و تعداد لایه‌ی ثابـت، فقـط تا طـول معینـی محسـوس مـی‌باشـد و بعـد از آن تغییرات بسیار ناچیز است. این بدان معنی است که برای ویژگی‌هـای معینـی از خـاک و ژئوسـنتتیک، طول گیرداری بهینه‌ای برای مسلح‌کننده وجود دارد که اگر طول ژئوسـنتتیک از آن بیشـتر شـود، تـأثیر

زیادی بر کاهش تغییرشکل‌ها ندارد. این طول بهینه به‌ازای فواصل عمودی گوناگون بین لایه‌ها، متفاوت می‌باشد. هم‌چنین به‌ازای سختی محوری و فاصله‌ی معین بین لایه‌های مسلح‌کننده، همواره ارتفاعی در دیوار وجود دارد که افزایش طول ژئوسنتتیک برای قسمت‌های بالاتر از آن تأثیری در مقادیر نیروهای کششی بیشینه‌ی مسلح‌کننده‌ها ندارد.

٤- با افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز، از مقدار تغییرشکل‌های افقی دیوار کاسته می‌شود. اما اثر افزایش زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک بر کاهش تغییرشکل‌های دیوار بیش از مقدار معینی، تقریباً ثابت می‌باشد و مقدار کاهش تغییرشکل‌ها و نشست‌ها روند یکنواختی دارد. هم‌چنین با افزایش میزان زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک‌ریز، از مقدار نیروی محوری بیشینه ژئوسنتتیک کاسته می‌شود. اما هنگامی‌که زاویه‌ی اصطکاک داخلی خاک از حدی بیشتر می‌شود، مقادیر کاهش نیروی محوری بیشینه‌ی ژئوسنتتیک تقریباً ثابت می‌باشد.

مراجع

۱. شفابخش، غلامعلی و حداد، عبدالحسین، " امکان‌سنجی اجرای دیوار خاک با ژئوسنتتیک و بررسی موردی آن در جاده‌ی ویژه‌ی گلستان"، پژوهشنامه‌ی حمل و نقل، سال پنجم، شماره‌ی اول، بهار ۱۳۷۸.

2. Elias, V., Christopher, B.R. and Berg, R.R., "Mechanically Stabilized Earth Walls and Einforced Soil Slopes Design and Construction Guidelines", Repot No.FHWA-NHI-00-043, FHWA-US Dept. of Transportation, Washington, DC, (2001).

3. Xeidakis, G.S, Torok, A. and Kleb, B., "Engineering Geological Problems Associated With Karst Terrains: Their Investigation, Monitoring, And Mitigation And Design Of Engineering Structures On Karst Terrains", Proceedings of the 10th International Congress, Thessaloniki, (2004).

4. Rowe, R.K. and Ho, S.K., "Finite Element Analysis of Geosynthetics Reinforced Soil Walls", *Journal of Geosynthetics,* pp. 203-216, (1993).

5. Budhu, M. and Halloum, M., "Seismic external stability of geo textile reinforced walls", *in Fifth international conference on geotextiles,* geomembrane and related Products, Singapore, (1994).

6. Abdi, R., De Buhan, P. and Pastor, J., "Calculation of the Critical Height of a Homogenized Reinforced Soil Wall: A Numerical Approach", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics,* Vol. 18, Issue 7, pp. 485–505, (1994).

7. Zhenqi CAI. and Bathurst, R. J., "Seismic Response of Geosynthetic Reinforced Soil Segmental Retaining Walls by Finite Element Method", *Journal of Computers and Geotechnics,* pp. 523-546, (1995).

8. Otani, J., Hirai, T., Ochiai, H. and Shinowaki, S., "Evaluation of Foundation Support Geosynthetic Reinforced Soil Wall on Sloping Ground", *Sixth International Conference on Geosynthetic,* pp. 601-604, (1998).

9. Skinner, G.D. and Rowe, R.K., "Design and Behaviour of a Geosynthetic Reinforced Retaining Wall and Bridge Abutment on a Yielding Foundation", *Journal of Geotextile and Geomembranes,* Vol. 23,

pp. 234-260, (2005).

10. Won, M.S. and Kim, Y.S., "Internal deformation behavior of geosynthetic-reinforced soil walls", *Journal of Geotextile and Geomembranes,* Vol. 25, pp. 10-22, (2007).
11. Klar, A. and Sas, T., "The KC method: Numerical Investigation of a New Analysis Method for Reinforced Soil Walls", *Journal of Computers and Geotechnics,* Vol. 37, Issue 3, pp. 351-358, (2010).
12. 36- Brinkgreve, R.B.J., et al., "Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analyses", Delft University of Technology, the Netherlands, (1998).
13. Chungsik Yoo., "Performance of a 6-year-old geosynthetic reinforcedsegmental retaining wall", *Journal of Geotextile And Geomembranes,* Vol. 19, Issue 5, pp. 377-397, (2004).
14. Jewell R.A., "Some Effects of Reinforcement on the Mechanical Behavior of Soils", PhD Thesis, University of Cambridge, (1980).